



طراحی و تحلیل یک ژنراتور بادی پیزوالکتریک با ساختار اگزتیک به کمک روش اجزاء محدود

مرتضی سعدی^۱، حسام مکوندی^{۱*}، علی اکبر عظمتی^۱

۱. گروه مهندسی مکترونیک، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

* نویسنده مسئول: hesam.makvandi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸

چکیده

با بهبود مستمر فناوری مدارهای مجتمع و فناوری سیستم‌های الکترومکانیکی میکرو/نانو، توسعه دستگاه‌های ژنراتور کوچک به یک روند اجتناب‌ناپذیر در توسعه سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی تبدیل شده است. از آنجا که حجم دستگاه‌های الکترونیکی به طور مداوم کاهش می‌یابد، در نتیجه آن می‌توان با استفاده از ژنراتورهای پیزوالکتریک انرژی باد، انرژی مورد نیاز ریزدستگاه‌ها را به راحتی تامین نمود. در این پژوهش ضمن تحلیل رفتار مبدل‌های پیزوالکتریک به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، با استفاده از ساختارهای اگزتیک^۱ روشی به منظور افزایش توان استحصال شده از ژنراتورهای بادی نیز ارائه گردیده است. به این منظور سه نوع ساختار اگزتیک متفاوت مورد استفاده قرار گرفته و تاثیر جنس و ضخامت لایه اگزتیک بر رفتار سازه مورد تحلیل قرار گرفته است. بررسی نتایج بدست آمده نشان‌دهنده افزایش قابل قبول در ولتاژ خروجی لایه پیزوالکتریک با استفاده از ساختارهای اگزتیک می‌باشد به نحوی که با استفاده از این نوع ساختار افزایش ۱۰۰ درصدی در خروجی قابل دستیابی است. همچنین افزایش چشمگیری در پتانسیل الکتریکی بدست آمده به کمک ساختارهای اگزتیک با شکل مشابه از جنس فولاد نسبت به ساختارهای آلومینیومی مشاهده گردید که این مسئله موید تاثیر شکل هندسی و جنس این ساختارها بر توان خروجی ژنراتور می‌باشد.

کلمات کلیدی: ژنراتور بادی، پیزوالکتریک، ساختار اگزتیک، افزایش توان

مقدمه

امروزه امنیت انرژی و نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، توجه جهانی را به منابع انرژی‌های پایدار و تجدیدپذیر جلب کرده است. طیف گسترده‌ای از فرآیندها و تکنیک‌ها برای استفاده از انرژی‌های جدید مورد مطالعه و توسعه قرار گرفته‌اند. انرژی محیط به عنوان یک منبع انرژی در دسترس و قابل برداشت، پتانسیل بالایی برای تولید برق برای تامین انرژی دستگاه‌های الکترونیکی دارد. مواد پیزوالکتریک به عنوان یکی از مکانیسم‌های شناخته شده جمع‌آوری انرژی، نقش مهمی در تبدیل انرژی محیط به انرژی الکتریکی دارند، به‌ویژه در دستگاه‌های الکترونیکی کوچک مانند دستگاه‌های اندازه‌گیری در محیط‌های دور یا متخاصم که باتری‌ها گزینه قابل قبولی نیستند. به همین دلیل، برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک می‌تواند به بهینه‌سازی وزن سازه‌ها و تامین پایدار انرژی آن‌ها کمک کند. با بهبود مستمر فناوری مدارهای مجتمع و فناوری سیستم‌های الکترومکانیکی میکرو/نانو، توسعه دستگاه‌های ژنراتور کوچک به یک روند اجتناب‌ناپذیر در توسعه سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی تبدیل شده است. همانگونه که پیشتر اشاره شد، حجم دستگاه‌های الکترونیکی به طور روزانه کمتر و کمتر خواهد شد. فلذا تقاضا برای انرژی کمتر و کمتر خواهد شد. از آنجا که با توسعه فناوری میکروالکترونیک، مصرف برق کمتر و کمتر می‌شود، می‌توان با استفاده از ژنراتورهای پیزوالکتریک انرژی باد، ریزدستگاه‌ها را تامین نمود.

پریا^[۱] یک ژنراتور پیزوالکتریک از نوع آسیاب بادی طراحی کرد. در طرح او دوازده تیر دو شکلی پیزوالکتریک به طور مساوی در اطراف لوله استوانه‌ای حول محور افقی آسیاب بادی چیده شده‌اند و یک صفحه متحرک نیز بر روی محور مجهز شده است. هنگامی

¹ Auxetic



که ژنراتور کار می‌کرد، تیغه توسط باد به چرخش در می‌آمد و گشتاور تولید شده از طریق مکانیسم بادامک و جرم معلق به محور آسیاب بادی منتقل می‌شد تا مضراب و تیرهای دو شکل پیزوالکتریک را به ارتعاش درآورد و بار الکتریکی تولید کند. راندمان تبدیل انرژی ژنراتور ۱۸٪ بود در حالی که در ژنراتورهای مشابه تنها ۱٪ بود. بانگ و همکاران [۲] یک ژنراتور آسیاب بادی پیزوالکتریک از نوع ضربه‌ای را پیشنهاد نمود. هنگامی که ژنراتور کار می‌کند، تیرهای بیمورف پیزوالکتریک به توپ فولادی با حرکت آزاد برخورد کرده و برق تولید می‌نماید. هنگامی که از ۱۰ تیر بیمورف پیزوالکتریک و ۷ توپ فولادی استفاده شد، ۶۱۳ میکرووات الکتریسیته می‌تواند با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه و مقاومت مشابه ۲۰ کیلو اهم تولید شود. ژو [۳] و لو [۴] ژنراتور پیزوالکتریک با فنجان باد را برای بهبود بازده جذب انرژی باد پیشنهاد نمودند. در حالی که ژنراتور در حال کار باشد، چوب با فنجان‌های باد می‌چرخد تا لرزاننده‌های پیزوالکتریک تحریک شوند. نتایج نشان داد که سرعت آستانه باد حدود ۳ متر بر ثانیه و مقاومت بهینه تیرهای یکسر گیردار پیزوالکتریک مستطیلی یا دوزنقه‌ای به ترتیب ۲۵ کیلو اهم با توان خروجی متناظر ۰/۱۱ میلی‌وات و ۰/۱۳ میلی‌وات بود. ژانگ و همکاران [۵] برای بهبود قابلیت اطمینان و پهنای باند موثر برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک چرخشی، یک برداشت‌کننده انرژی دورانی جدید با استفاده از مبدل پیزوالکتریک تغییر شکل نامتقارن برانگیخته‌شده توسط نیروی جاذبه مغناطیسی را ارائه نمودند. بر خلاف برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک چرخشی‌های قبلی که عناصر پیزوالکتریک کرنش دو طرفه متقارن را تجربه کردند، مبدل پیزوالکتریک ارائه شده تنها در معرض کرنش فشاری یک طرفه قرار گرفت. آنها به این روش بهترین استفاده را از ویژگی‌های تغییر شکل ویراتورهای *PZT* در جایی که تنش فشاری مجاز آنها بسیار بیشتر از تنش کششی مجاز بود، انجام و از این طریق احتمال آسیب ویراتورهای *PZT* تحت بارهای سنگین غیرمنتظره را کاهش دادند. کریم‌زاده و همکاران [۶] عملکرد یک برداشت‌کننده انرژی باد پیزوالکتریک مبتنی بر سیلندر متصل به یک تیر الاستیک را به صورت عددی شبیه‌سازی نمودند، که در آن باد عمود بر محور تیر باعث ایجاد نیروی آیرودینامیکی نوسانی بر نوک تیر می‌گردید. آنها به منظور بررسی تأثیرات این نیرو، تیر و لایه پیزوالکتریک به عنوان اجسام پیوسته الاستیک مدل‌سازی نمودند و معادلات حاکم بر لایه‌های جامد و پیزوالکتریک را استخراج کردند. همچنین ایشان به منظور تخمین نیروی بالابر ناشی از ریزش گردابی در پایین دست سیلندر از معادله نوسان‌ساز واندرپل اصلاح شده استفاده نمودند. مزار و همکاران [۷] با توجه به دشواری ارائه یک مدل تحلیلی دقیق که بتواند دقیقاً رفتار ژنراتور پیزوالکتریک از جمله تعامل غیرمستقیم با جریان هوا را توصیف کند، بر تحقیقات تجربی برای به دست آوردن نتایج برداشت‌کننده‌های انرژی از برداشت‌کننده‌های انرژی بادی پیزوالکتریک با تماس غیرمستقیم متمرکز شدند. آنها یک مدل تحلیلی که می‌تواند نتایج خوبی را با توجه به آزمایشات تجربی نشان دهد، ارائه نمودند. نتایج به دست آمده مربوط به جابجایی مبدل پیزوالکتریک است که به طور غیرمستقیم توسط یک ارتعاش ناشی از گرداب و ولتاژ تولید شده با توجه به جرم متفاوت پوسته استوانه‌ای برانگیخته می‌شود. نتایج عددی مدل مطابقت قابل توجهی با نتایج تجربی نشان می‌دهد. علاوه بر این، مقدار جرم بهینه مبدل پیزوالکتریک تقریباً توسط مدل تحلیلی پیشنهادی تعیین شد. سیلوا و همکاران [۸] یک نوع ژنراتور پیزوالکتریک انرژی باد بدون تماس را طراحی نمودند که به راحتی مونتاژ می‌شود و در مقایسه با سایر دستگاه‌ها، چگالی انرژی بالایی را برای کاربردهای توان کم فراهم می‌نمود. ایشان به بررسی عملکرد پارامترهای مختلفی که بر تولید انرژی تأثیر می‌گذارند، از طریق مدل‌ها و نمونه‌های اولیه پرداختند.

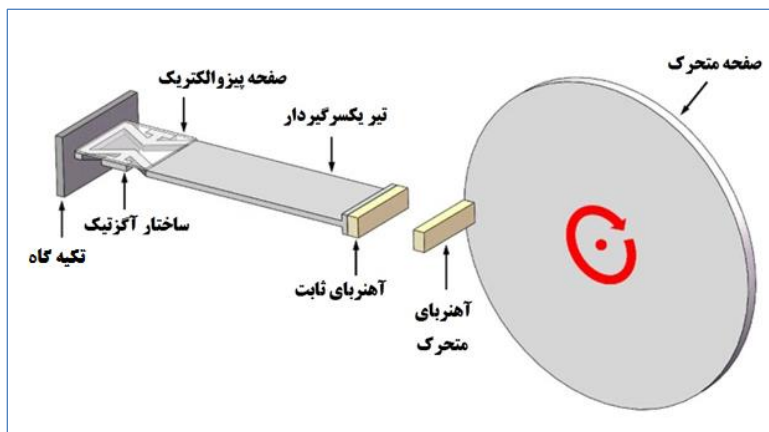
با توجه به بررسی پیشینه پژوهش‌های انجام شده مشاهده می‌گردد، که در راستای بهبود عملکرد ژنراتورهای پیزوالکتریک بادی و به منظور افزایش توان خروجی این نوع از ژنراتورها با استفاده از ساختارهای آگزتیک، تحقیقات خاصی صورت نگرفته است.

مدل‌سازی اجزاء محدود

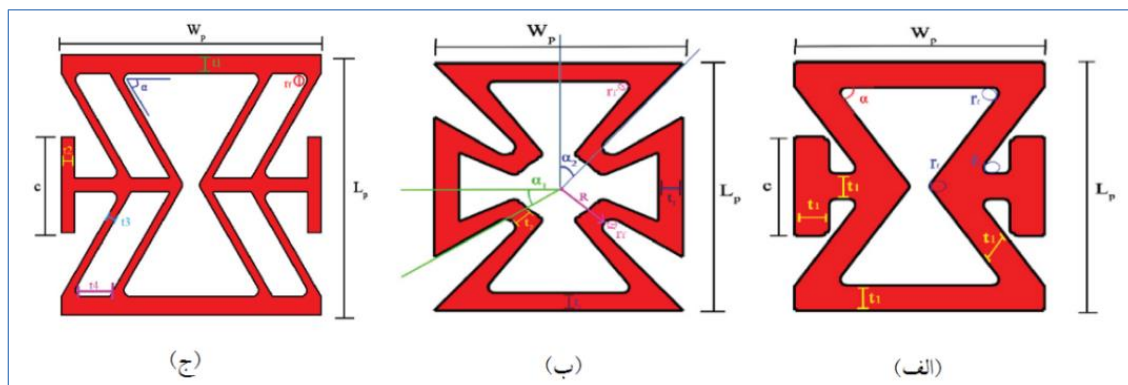
اولین گام در استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود، ایجاد مدل هندسی است. این نرم‌افزارها کم و بیش از امکاناتی جهت مدل‌سازی هندسی برخوردارند. اما برای مدل‌های پیچیده به ناچار باید از نرم‌افزارهای مدل‌سازی که دارای قابلیت‌های زیادی برای مدل‌سازی می‌باشند، بهره گرفت و از خروجی‌های آن در نرم‌افزارهای اجزاء محدود استفاده نمود. مدل هندسی دربرگیرنده شکل



ظاهری مسئله است، لذا اجزاء مدل هندسی باید به گونه‌ای باشند که بتوان بهترین مدل اجزاء محدود را با استفاده از مدل هندسی ساخت. در شکل (۱) نمونه‌ای از ژنراتور در نظر گرفته شده نمایش داده شده است. در این پژوهش، به منظور ساخت مدل هندسی از نرم افزارهای سالدورکز استفاده شده است. بدین منظور، با استفاده از ابعاد ارایه شده در جدول (۱) مدل‌های هندسی مشابه شکل (۲) ساخته می‌شود. پس از آن مدل‌های هندسی جهت ایجاد مدل اجزاء محدود و تحلیل به نرم‌افزار آباکوس ارسال می‌گردد. با توجه به شکل (۱) مشاهده می‌شود که ساختار تیرهای در نظر گرفته شده از یک سو تحت بارکششی بوده و از سوی دیگر در تکیه گاه ثابت قرار دارند.



شکل ۱: ساختار ژنراتور بررسی شده



شکل ۲: ساختارهای آگزتیک متفاوت بررسی شده و پارامترهای مربوطه: (الف) آگزتیک ۱ (ب) آگزتیک ۲ (ج) آگزتیک ۳

پس از ایجاد مدل هندسی متناسب با شکل ظاهری مسئله، با المان‌بندی مدل و تعریف خواص مواد موجود در مسئله مطابق جدول (۲) و اعمال شرایط مرزی و بارگذاری بر مدل، مدل اجزاء محدود از یک مسئله ایجاد می‌شود. در بحث المان‌بندی بر روی مدل، روش متداول بدین صورت است که المانی برای مدل انتخاب می‌شود که بتوان با کمک آن رفتار مدل فیزیکی را توجیه کرد. لذا ابتدا بایستی نسبت به رفتار مدل آشنایی داشت. شناخت المان‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در راستای استحصال جواب‌های صحیح و قابل اطمینان دارد. در نرم‌افزار آباکوس المان‌های متنوعی برای تحلیل‌های متفاوت وجود دارد. در این پژوهش، با توجه به اصول ذکر شده، المان‌های $C3D20R$ و $C3D20RE$ مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



جدول ۱: ابعاد هندسی ساختارهای آگز تیک ارزیاب شده در شکل ۲

قطعه	پارامتر	اندازه	واحد
وصله پیزوالکتریک	طول L_p	۲۵	میلی‌متر
	عرض W_p	۲۵	میلی‌متر
تیر	طول	۹۵	میلی‌متر
	عرض	۲۵	میلی‌متر
	ضخامت A_1	۰/۷	میلی‌متر
	ضخامت St	۷/۰	میلی‌متر
ساختار آگز تیک ۱	طول L_p	۲۵	میلی‌متر
	عرض W_p	۲۵	میلی‌متر
	t_1	۲	میلی‌متر
	c	۱۱	میلی‌متر
	شعاع فیلت	۰/۵	میلی‌متر
	زاویه سل	۳۹	درجه
ساختار آگز تیک ۲	طول L_p	۲۵	میلی‌متر
	عرض W_p	۲۵	میلی‌متر
	t_1	۴/۵	میلی‌متر
	t_2	۵/۵	میلی‌متر
	شعاع فیلت	۰/۶	میلی‌متر
	زاویه سل ۱	۳۵	درجه
	زاویه سل ۲	۴۳	درجه
ساختار آگز تیک ۳	طول L_p	۲۵	میلی‌متر
	عرض W_p	۲۵	میلی‌متر
	t_1	۲	میلی‌متر
	t_2	۱/۵	میلی‌متر
	t_3	۱	میلی‌متر
	t_4	۰/۹	میلی‌متر
	C	۱۰	میلی‌متر
	شعاع فیلت	۰/۵	میلی‌متر
	زاویه سل ۱	۵۷	درجه

شکل (۳) مدل‌های هندسی پایه‌های ساخته شده در نرم‌افزار سالی‌دورکز را نمایش می‌دهد. در این پژوهش یک ساختار ساده مشابه شکل (۳-الف) و سه ساختار آگز تیک با هندسه متفاوت برای بررسی تاثیر تغییر شکل‌های آگز تیک بر رفتار صفحه پیزوالکتریک در نظر گرفته شده است.

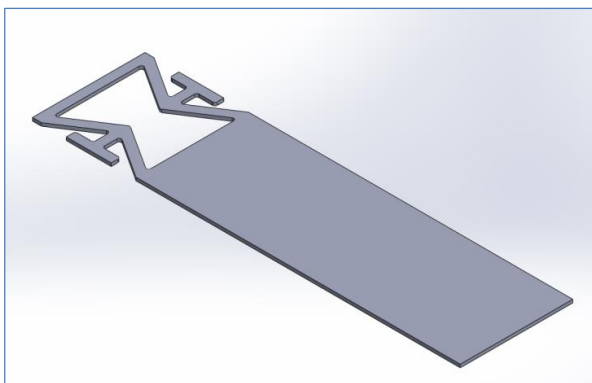


جدول ۲: خواص مواد

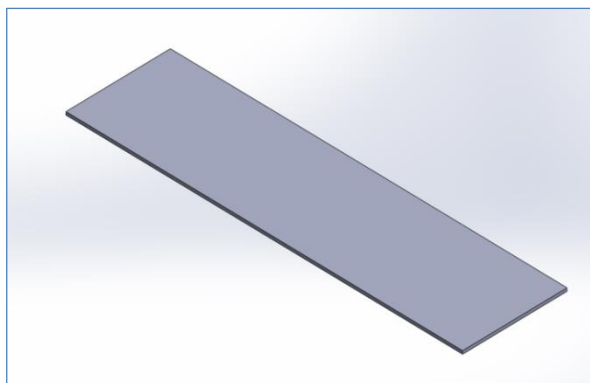
واحد	مقدار	خاصیت	ماده
Kg/m^3	۲۷۰۰	چگالی	آلومینیوم
-	۰/۳۳	ضریب پواسون	
GPa	۶۹/۱	مدول الاستیسیته	
Kg/m^3	۷۸۵۰	چگالی	فولاد
-	۰/۳	ضریب پواسون	
GPa	۲۰۰	مدول الاستیسیته	
Kg/m^3	۷۵۰۰	چگالی	PZT-5h
GPa	۶۰/۶۱	E_1	
GPa	۴۸/۳۱	E_2	
GPa	۶۰/۶۱	E_3	
-	۰/۵۱۲	ν_{12}	
-	۰/۲۸۹	ν_{13}	
-	۰/۴۰۸	ν_{23}	
GPa	۲۳	G_{12}	
GPa	۲۳/۵	G_{13}	
GPa	۲۳	G_{23}	
$m/volt$	۷۴۱	d_{14}	
$m/volt$	-۲۷۴	d_{21}	
$m/volt$	۵۹۳	d_{22}	
$m/volt$	-۲۷۴	d_{23}	
$m/volt$	۷۴۱	d_{36}	
$Farad/m$	$۱/۵۰۵ \times ۱۰^{-۸}$	D_{11}	
$Farad/m$	$۱/۳۰۱ \times ۱۰^{-۸}$	D_{22}	
$Farad/m$	$۱/۵۰۵ \times ۱۰^{-۸}$	D_{33}	

نتایج

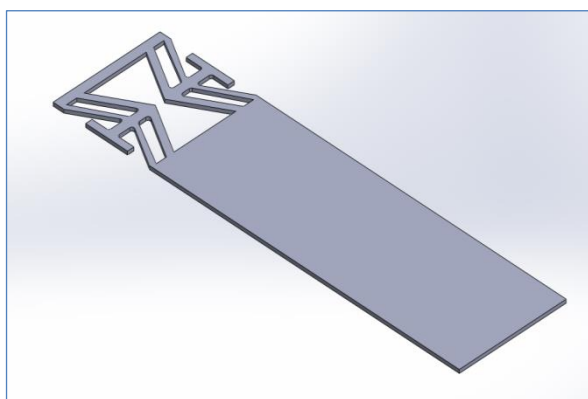
یکی از مهم‌ترین گام‌های حل مسائل به کمک روش اجزاء محدود، بررسی همگرایی نتایج بدست آمده می‌باشد. در ادامه نتایج بدست آمده برای مدلی که با استفاده از ساختار آگزتیک ۱ ساخته شده است ارائه می‌گردد. به منظور بررسی همگرایی نتایج حاصل توزیع تنش ون مایرز در صفحه پیزو الکتریک متصل به ساختار آگزتیک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان داد که با استفاده از ۲۵۰۰ المان می‌توان به نتایج قابل قبولی دست یافت. نمودار همگرایی نتایج به ازای حداکثر تنش ون مایرز در شکل (۴) نمایش داده شده است. همچنین توزیع تنش به ازای مقادیر مختلف المان استفاده شده در شکل (۵) ارائه گردیده است.



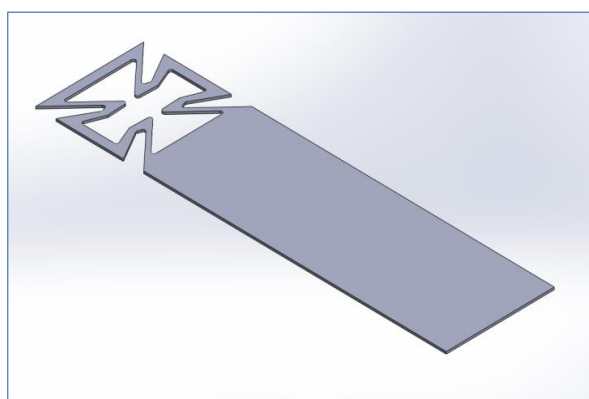
(ب) آگزتیک ۱



(الف) تیر ساده

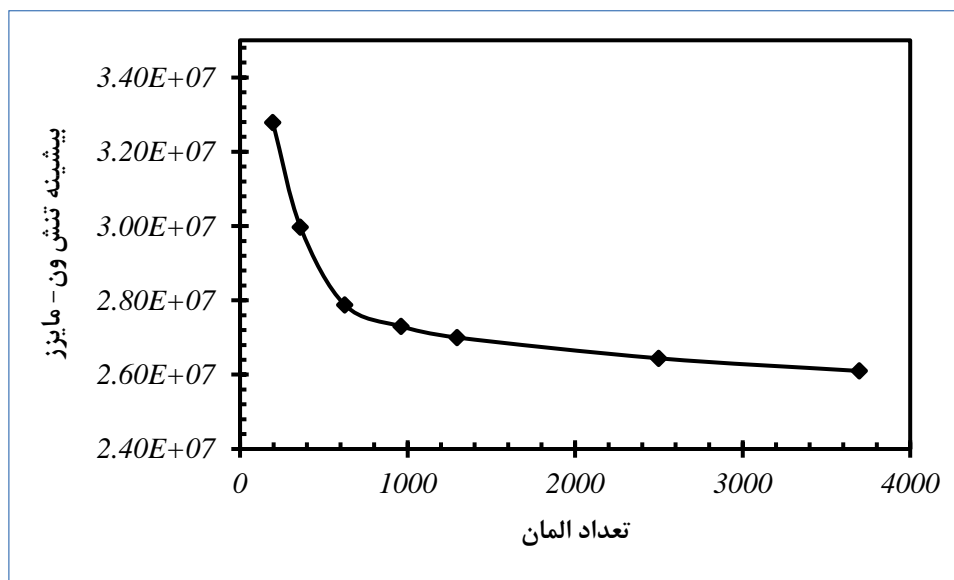


(د) آگزتیک ۳

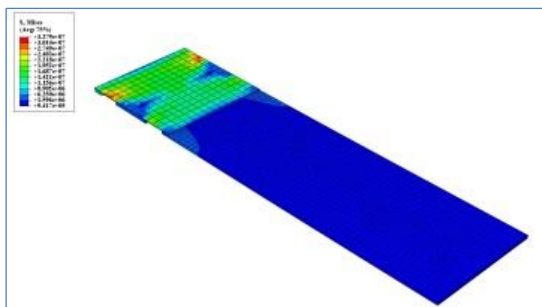


(ج) آگزتیک ۲

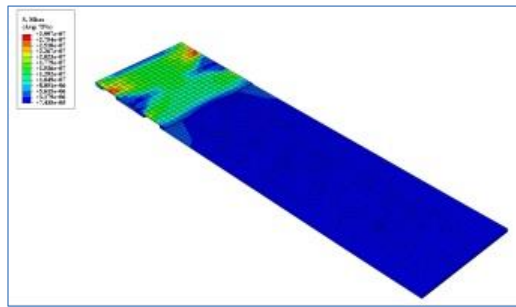
شکل ۳: مدل‌های هندسی تیرهای ساخته شده در نرم افزار سالیدورکز



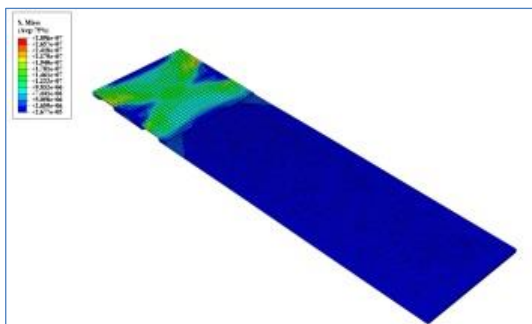
شکل ۴: همگرایی نتایج بدست آمده به ازای مقادیر متفاوت المان‌های پیزوالکتریک



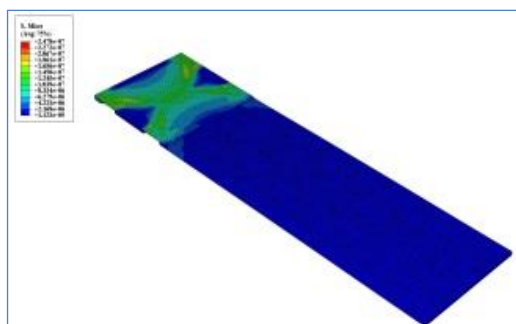
۱۹۶ المان



۳۶۱ المان



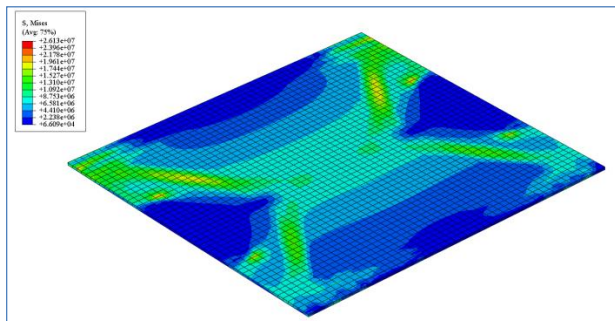
۹۶۱ المان



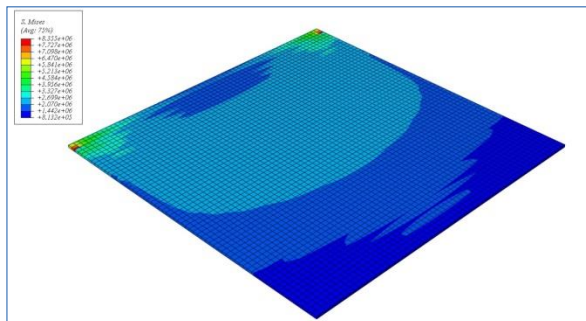
۲۵۰۰ المان

شکل ۵: توزیع تنش به ازای مقادیر مختلف المان‌های پیزوالکتریک

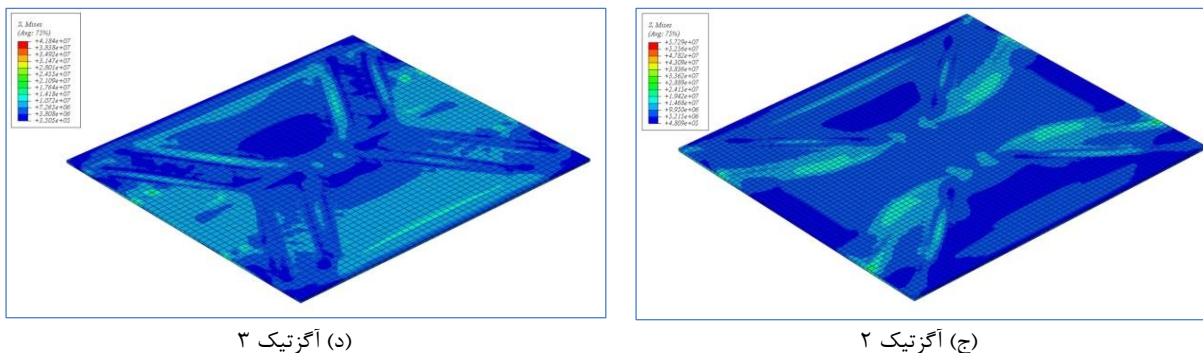
برای هر ۴ ساختار ارایه شده در شکل (۳) بررسی همگرایی انجام گرفته است و نتایج ارایه شده در ادامه بر این اساس می‌باشند. در ادامه در شکل (۶) توزیع تنش برای صفحه پیزوالکتریک در هر چهار حالت فوق‌الذکر ارایه گردیده است. با بررسی تصاویر ارایه شده در شکل (۶) مشاهده می‌شود که در حالتی که از پایه‌های آگزتیک استفاده شده است. میزان حداکثر تنش القا شده در صفحه پیزوالکتریک نسبت به پایه ساده بشدت افزایش می‌یابد. میزان این افزایش برای ساختار آگزتیک ۱، آگزتیک ۲ و آگزتیک ۳، به ترتیب ۲۱۴٪، ۵۸۶٪ و ۴۰۱٪ می‌باشد که ناشی از افزایش تغییر شکل ورق پیزوالکتریک در اثر خاصیت آگزتیک ساختار می‌باشد. در ادامه شکل (۷) پتانسیل الکتریکی القا شده در صفحه را نمایش می‌دهد.



(ب) آگزتیک ۱



(الف) تیر ساده

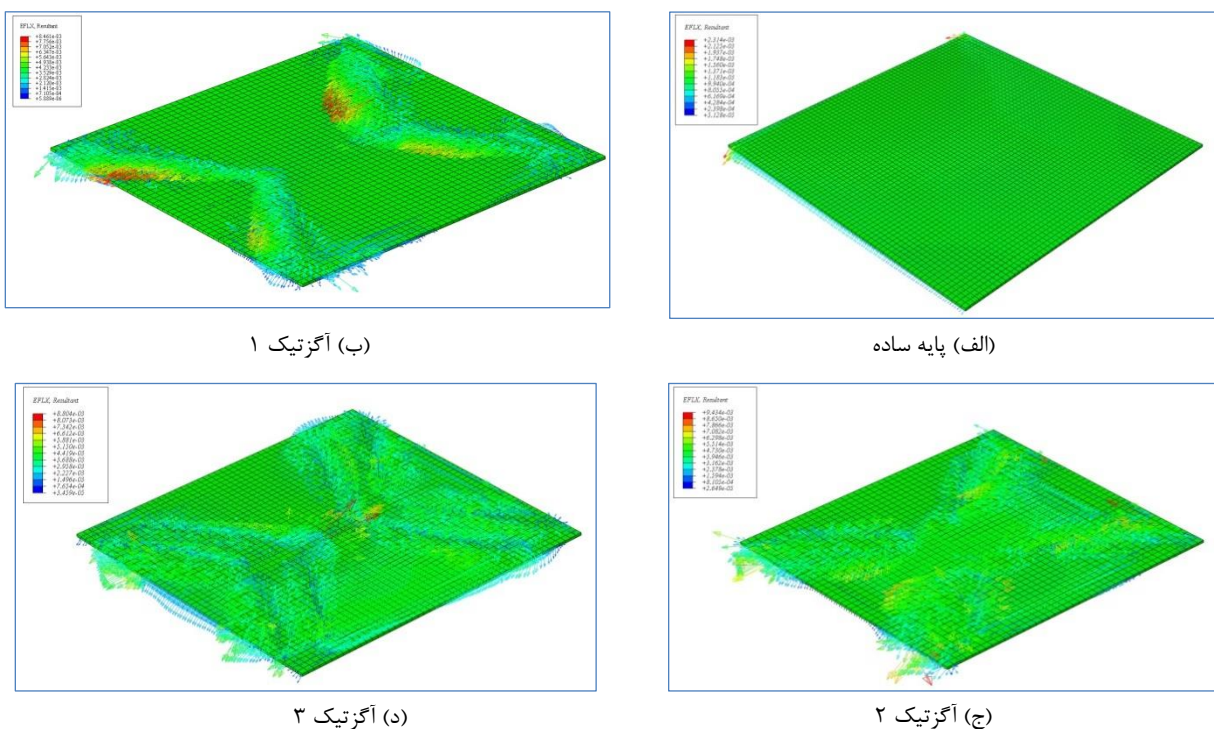


(د) آگزتیک ۳

(ج) آگزتیک ۲

شکل ۶: توزیع تنش در صفحات پیزوالکتریک

بررسی توزیع پتانسیل الکتریکی القا شده بر صفحات پیزوالکتریک بیان کننده افزایش پتانسیل الکتریکی القا شده در صفحات با استفاده از ساختارهای آگزتیک می باشد. بطوری که ساختار آگزتیک ۱ موجب افزایش ۸۷٪/۶۳ و ساختار آگزتیک ۳ موجب افزایش ۶۱٪/۵۰ پتانسیل الکتریکی القا شده در سازه می گردند. همچنین مشخص گردید که ساختار آگزتیک ۲ با افزایش ۱۰۰٪/۶۲ پتانسیل الکتریکی القا شده، بیشترین افزایش را در پتانسیل الکتریکی موجب می گردد و لذا در استفاده از این نوع ساختار، کارایی بیشتری مورد انتظار است. در شکل (۷) چگونگی توزیع بردارهای شار الکتریکی در صفحات پیزوالکتریک نمایش داده شده است.



(ب) آگزتیک ۱

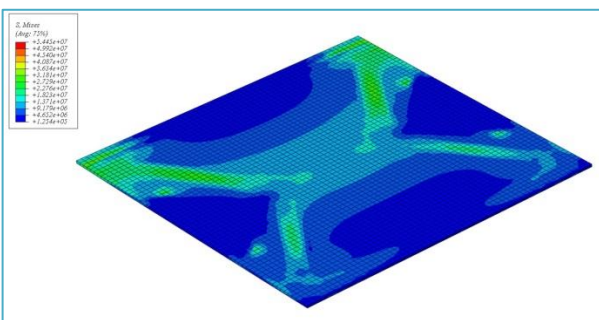
(الف) پایه ساده

(د) آگزتیک ۳

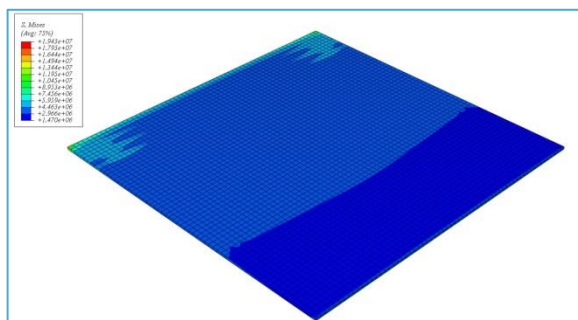
(ج) آگزتیک ۲

شکل ۷: چگونگی توزیع بردارهای شار الکتریکی در صفحات

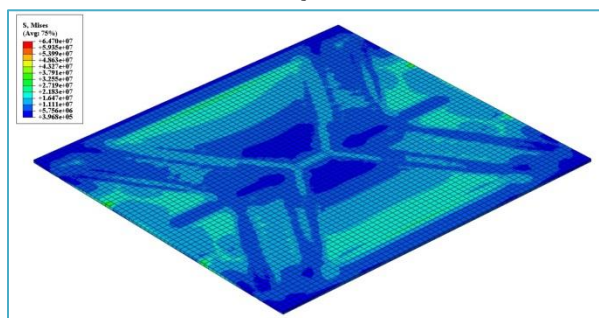
در ادامه به منظور بررسی تاثیر جنس ماده سازنده پایه بر پتانسیل الکتریکی و تنش القا شده در صفحات پیزوالکتریک، نتایج برای پایه‌هایی با ابعاد و هندسه مشابه از جنس فولاد ارایه می گردد. در شکل (۸) توزیع تنش برای صفحه پیزوالکتریک در چهار حالت قبل با استفاده از پایه فولادی ارایه گردیده است.



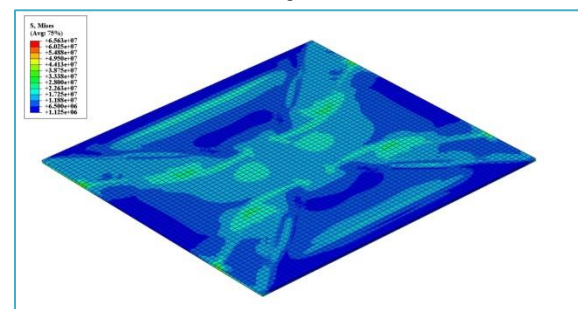
(ب) آگزتیک ۱



(الف) تیر ساده



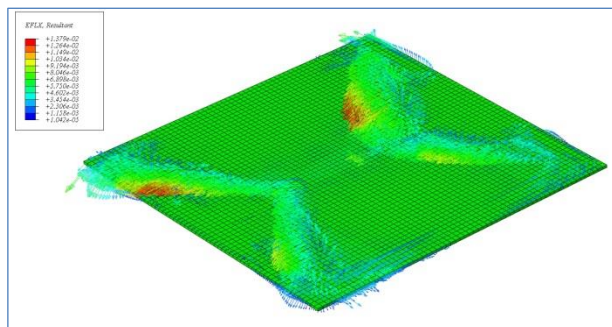
(د) آگزتیک ۳



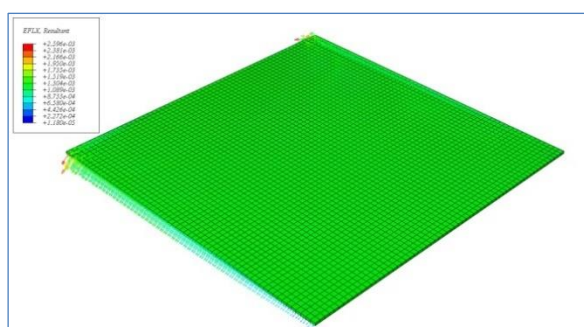
(ج) آگزتیک ۲

شکل ۸: توزیع تنش در صفحات پیزوالکتریک با پایه فولادی

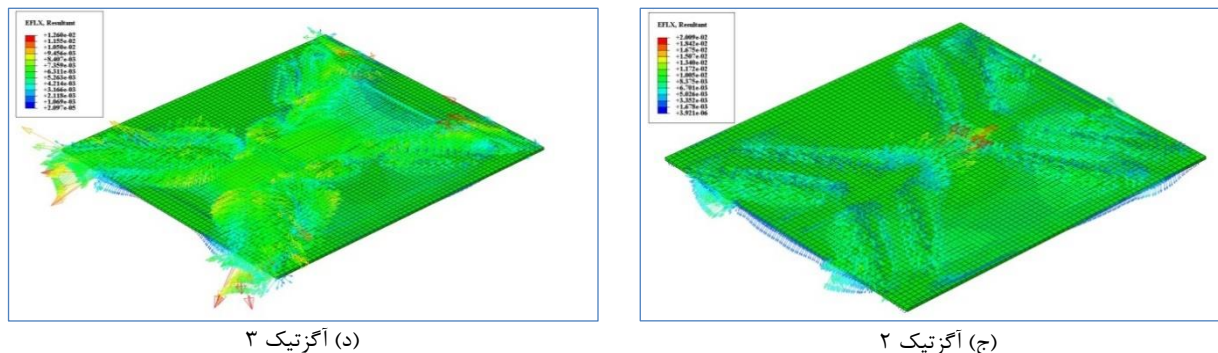
با بررسی تصاویر ارائه شده در شکل (۸) مشاهده می‌شود که در حالتی که از پایه‌های آگزتیک استفاده شده است میزان حداکثر تنش القا شده در صفحه پیزوالکتریک نسبت به پایه ساده به شدت افزایش می‌یابد. میزان این افزایش برای ساختار آگزتیک ۱، آگزتیک ۲ و آگزتیک ۳، به ترتیب $180/23$ ، $237/77$ و 233 می‌باشد که ناشی از افزایش تغییر شکل ورق پیزوالکتریک در اثر خاصیت آگزتیک ساختار می‌باشد اما مشاهده می‌شود که این میزان افزایش در مقایسه با آلومینیوم بسیار کمتر است. بررسی توزیع پتانسیل الکتریکی القا شده بر صفحات پیزوالکتریک، نشان‌دهنده افزایش پتانسیل الکتریکی القا شده در صفحات با استفاده از ساختارهای آگزتیک می‌باشد. به طوری که ساختار آگزتیک ۱ موجب افزایش $183/60$ و ساختار آگزتیک ۳ موجب افزایش $218/03$ پتانسیل الکتریکی القا شده در سازه می‌گردند. همچنین مشخص گردید که ساختار آگزتیک ۲ با افزایش $265/57$ پتانسیل الکتریکی القا شده، بیشترین افزایش را در پتانسیل الکتریکی موجب می‌گردد و لذا در استفاده از این نوع ساختار، کارایی بیشتری مورد انتظار است. در شکل (۹) چگونگی توزیع بردارهای شار الکتریکی در صفحات پیزوالکتریک نمایش داده شده است.



(ب) آگزتیک ۱



(الف) پایه ساده



شکل ۹: چگونگی توزیع بردارهای شار الکتریکی در صفحات پیزوالکتریک بر روی پایه های فولادی

نتیجه گیری

در این پژوهش روشی به منظور مدل‌سازی تاثیر ساختارهای آگزتیک بر عملکرد صفحات پیزوالکتریک به کمک روش اجزاء محدود ارائه شده است. برای حل مدل ساخته شده، ابتدا مدل به کمک روش اجزاء محدود گسسته شده و پاسخ به ازای ورودی‌های متفاوت محاسبه شده است. پس از اطمینان از صحت عمل مدل، نتایج به ازای ساختارهای آگزتیک متفاوت و جنس‌های مختلف تیر استفاده شده بررسی گردید. بررسی نتایج نشان داد که ساختارهای آگزتیک موجب افزایش پتانسیل الکتریکی القا شده در سازه می‌گردند. میزان این افزایش ساختار آگزتیک ۲ با افزایش ۱۰۰٪/۶۲ پتانسیل الکتریکی القا شده، بیشترین افزایش در پتانسیل الکتریکی القا شده می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که استفاده از فولاد در ساختار تیر پایه موجب افزایش بیشتر پتانسیل الکتریکی نسبت به حالت مورد استفاده از آلومینیوم می‌گردد.

مراجع

- [1] Priya, S., Chen, C.T., Fye, D., Zahnd, J., (2005). Piezoelectric Windmill: A Novel Solution to Remote Sensing. Japanese Journal of Applied Physics, 44(1L), L104.
- [2] Yang, Y., Shen, Q., Jin, J., Wang, Y., Qian, W., Yuan, D., (2014). Rotational piezoelectric wind energy harvesting using impact-induced resonance. Applied Physics Letters, 105(5).
- [3] Xu, G.J. (2017). Research on Piezoelectric Harvesting Technology from Environment. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing.
- [4] Luo, Z.S. (2018). Design and Research of a New Piezoelectric Wind Energy Collector. Electronic University of Science & Technology of Hangzhou, Hangzhou.
- [5] Zhang, Z., Chai, J., Wu, Y., Wang, S., Kan, X., Tang, H., Kan, J., (2023). A rotational energy harvester utilizing an asymmetrically deformed piezoelectric transducer subjected only to unidirectional compressive stress, Energy Reports, 9, pp 657-668.
- [6] Karimzadeh, A., Roohi, R., Akbari, M., (2023). Piezoelectric wind energy harvesting from vortex-induced vibrations of an elastic beam, Scientia Iranica, Transactions B: Mechanical Engineering, 30(1), pp 77-89.
- [7] Mazar, H., Rzine, B., Bahsine, S., Radouani, M., Elfahime, B., El Gadari, M., (2022). Modeling and simulation of piezoelectric generator with indirect contact excited by vortex-induced vibration. In E3S Web of Conferences (Vol. 336, p. 00047). EDP Science
- [8] Silva, A.G.P., Sobrinho, J.M.B., Souto, C.D.R., Ries, A., de Castro, A.C., (2021), Design, modelling and experimental analysis of a piezoelectric wind energy generator for low-power applications, Sensors and Actuators A: Physical, 317, p 112462.